

УДК 622.831

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРИРОДНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ НА ОТВЕСНЫХ ГРАНИЦАХ ШАХТНОГО ПОЛЯ ПО ИЗМЕРЕННЫМ ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ СДВИЖЕНИЯМ ДНЕВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

¹Кравчук А.С., ²Смалюк А.Ф., ³Славашевич С.И., ⁴Мисников В.А.

¹*Белорусский государственный университет, Минск, e-mail: ask_belarus@inbox.ru;*

²*Белорусский национальный технический университет, Минск;*

³*ОАО «БЕЛАРУСЬКАЛИЙ», Солигорск;*

⁴*НПУП «Институт горного дела», Солигорск*

Разработана общая методика решения обратной задачи для определения приращения давлений на боковых поверхностях модели шахтного поля по горизонтальным сдвигениям дневной поверхности шахтного поля. Она позволяет учесть в геомеханических расчетах изменение напряженного состояния на отвесных границах моделей выработок любых полезных ископаемых в районах близких к сейсмически активным областям. С практической точки зрения для повышения точности решения обратной задачи выбираемые индикаторные точки должны располагаться вокруг геометрического центра тяжести модели дневной поверхности шахтного поля на значительном расстоянии от центра. Только в случае обеспечения достаточной точности измерений горизонтальных смещений индикаторных точек можно говорить об адекватном решении обратной задачи и определении изменения нагрузок на боковых вертикальных гранях модели шахтного поля. Установлено, что обратная задача будет иметь единственное решение, если боковых отвесных граней у модели шахтного поля четное число, а количество индикаторных точек, по которым устанавливаются горизонтальные сдвигения поверхности, равно половине количества боковых граней модели. Продемонстрированное решение обратной задачи определяет изменение среднего значения давления (или нормального напряжения) всей боковой грани модели шахтного поля целиком относительно предыдущих положений горизонтальных координат датчиков на дневной поверхности, принятых за исходное состояние системы. Разработан масштабируемый и параллелизуемый модуль решения обратных задач определения средних величин измененного природного распределения напряжений по данным натурных измерений горизонтальных сдвижений дневной поверхности модели шахтного поля II и III горизонтов шахтного поля IV РУ ОАО «Беларуськалий».

Ключевые слова: сдвигения дневной поверхности, шахтное поле, теория упругости, метод конечных элементов, геомеханика

DETERMINATION OF CHANGES IN PARAMETERS OF NATURAL DISTRIBUTION OF STRESSES ON THE STEEP SIDE SURFACES OF THE MINE FIELD BY MEASURED HORIZONTAL DISPLACEMENTS OF THE DAY SURFACE

¹Kravchuk A.S., ²Smalyuk A.F., ³Slavashevich S.I., ⁴Misnikov V.A.

¹*Belarusian State University, Minsk, e-mail: ask_belarus@inbox.ru;*

²*Belarusian National Technical University, Minsk;*

³*JSC «BELARUSKALIY», Soligorsk;*

⁴*NPUP «Institute of Mining», Soligorsk*

A general technique for solving the inverse problem for determining the increment of pressure on the side surfaces of the model of the mine field by horizontal shifts of the daily surface of the mine field is developed. It allows taking into account in geomechanical calculations the change of the stressed state on the vertical boundaries of the models of the excavations of any minerals in the regions close to the seismically active regions. From the practical point of view, in order to improve the accuracy of the solution of the inverse problem, the selected test points should be located around the geometric center of gravity of the model of the daily surface of the mine field at a sufficient distance from the center. Only when sufficient accuracy for measuring horizontal displacements of indicator points is provided, one can speak of an adequate solution of the inverse problem and of determining the change in loads on the lateral vertical faces of the minefield model. It is established that the inverse problem will have a unique solution if the minefield model have an even number of the side faces, and the number of indicator points along which horizontal surface displacements are established is equal to half of the number of side faces of the model. The demonstrated solution of the inverse problem determines the changes in the mean values of the pressures (or normal stresses) which act on the side face of the model of the mine field entirely with respect to the previous positions of the horizontal coordinates of the sensors on the day surface taken as the initial state of the system. A scalable and parallelizable module for solving inverse problems for the determination of the average values of the changed natural stress distribution from the full-scale measurements of the horizontal displacement of the day surface of the mine field model of the II and III horizons of the mine field of the IV RU of JSC «Belaruskali» was developed.

Keywords: day surface displacement, mine field, elasticity theory, finite element method, geomechanics

Очень важными в геофизике являются понятия о прямой и обратной задачах. Прямая задача геофизики сводится к расчету физического поля по известным параме-

трам возмущающего объекта [1–3]. Параметрами объекта являются: мощность, глубина залегания верхней и нижней кромок, угол падения, намагниченность, плотность

и т.п. [1–3]. Прямую задачу геофизики обычно решают на стадии проектирования геофизических работ. Получаемая при этом ожидаемая геофизическая аномалия помогает выбрать соответствующую измерительную аппаратуру и методику наблюдений. Обратная задача геофизики заключается в расчетах параметров и условий залегания аномалии образующего объекта по геофизической аномалии, полученной в результате полевых измерений [1, 2].

Обратная задача геофизики заключается в расчетах параметров аномалиеобразующего объекта по геофизической аномалии, полученной в результате полевых измерений. Ее решают на этапе интерпретации геофизических данных. К сожалению, нередко она может иметь несколько возможных вариантов решения [1].

В данной статье в качестве наблюдаемой аномалии выбрано горизонтальное сдвигение дневной поверхности шахтного поля [4]. В качестве определяемого в ходе решения обратной задачи параметра выбрано определение значения приращения величин равномерно распределенных нагрузок на вертикальных поверхностях модели шахтного поля, что представляет в настоящее время актуальную задачу [5].

Таким образом, по наблюдаемому горизонтальному сдвигению дневной поверхности делается вывод об изменении нагрузок, действующих на периметре модели шахтного поля (на отвесных границах шахтного поля в зависимости от внешних геологических факторов и деятельности человека в непосредственной близости от шахтного поля). Предполагается, что при решении прямой задачи с учетом заданного приращения равномерных нагрузок на отвесных границах шахтного поля в качестве внешних нагрузок будут использованы нормальные давления, последовательно прилагаемые к каждой из боковых поверхностей при закреплении нижней поверхности модели шахтного поля.

Данная задача решается в предположении чисто упругих деформаций породы шахтного поля без учета реологического поведения материала [6, 7].

Методика решения обратной задачи

Методика решения обратной задачи основана на том, что решение задачи теории упругости для твердотельной модели шахтного поля подчиняется принципу суперпозиции. То есть решение для модели шахтного поля может быть представлено

набором решений для нагрузок, принятых за единичные на отдельных поверхностях, и отсутствием нагрузок на остальных поверхностях.

Таким образом, методика решения обратной задачи основана на построении набора «реперных» решений прямой задачи. Учитывая многогранную геометрию модели шахтного поля, «реперным» решением будем называть решение прямой задачи, соответствующее приложению среднего, отличного от нуля давления, принятого за единичное, только к одной грани боковой поверхности модели шахтного поля.

Очевидно, что в случае использования гипотезы о линейно-упругом поведении неоднородной в среднем изотропной породы [6, 7] суперпозиция «реперных» решений с искомыми весовыми коэффициентами будет давать измеренные горизонтальные сдвигения дневной поверхности.

Таким образом, решение обратной задачи состоит в определении безразмерных весовых коэффициентов в суперпозиции «реперных» задач. Сами же безразмерные коэффициенты будут определять, во сколько раз реальное приращение давления будет отличаться от принятого за единичное. Количество «реперных» задач определяется количеством боковых вертикальных граней в модели шахтного поля.

Влияние краевых условий на однозначность решения задачи

Одним из основных краевых условий при решении как прямой, так и обратной задачи является то, что предполагается, что основание модели шахтного поля прочно сцеплено с абсолютно твердой и жесткой подстилающей поверхностью.

Это ограничение является существенным и необходимым для того, чтобы построить набор «реперных» решений, так как только оно гарантирует, что модель шахтного поля будет находиться в равновесии под действием равномерно распределенных нагрузок любого типа, приложенных к только одной боковой поверхности шахтного поля.

Таким образом, при жестком закреплении нижней границы модели лидирующими параметрами, определяющими сдвигения дневной поверхности, будут два перемещения в плоскости дневной поверхности (в направлениях Ox и Oy).

Отметим, что если модель шахтного поля представляет из себя ориентированный в декартовой системе параллелепипед, то решение обратной задачи по сдвигению

дневной поверхности будет однозначным. В этом случае количество реперных задач будет равно 4, соответственно, количество определяемых параметров (весовых коэффициентов для реперных задач) 4. В этом случае достаточно выбрать две точки на поверхности, в которых заданы по две проекции перемещений в декартовой системе координат, и это даст 4 уравнения для однозначного определения весовых коэффициентов для «реперных» решений, т.е. величин действующих нагрузок на гранях модели шахтного поля.

Однако модель шахтного поля представляет собой прямоугольную призму с непараллельным многоугольником в сечении. Соответственно, чтобы получить однозначно разрешимую систему (непереопределенную или недоопределенную) для вычисления весовых коэффициентов необходимо, чтобы количество вертикальных граней призмы (модели шахтного поля) было четным. Тогда для однозначного решения обратной задачи на дневной поверхности достаточно выбрать число индикаторных точек на дневной поверхности равное половине числа вертикальных граней в модели шахтного поля с заданными двумя горизонтальными проекциями перемещений вдоль декартовой системы координат.

Общие сведения по решению обратной задачи для модели шахтного поля

Для демонстрации решения обратной задачи использовалась многослойная модель шахтного поля II и III горизонтов шахтного поля IV РУ ОАО «Беларуськалий» (рис. 1). Нижняя грань модели шахтного поля полностью закреплена. Механические характеристики слоев приведены в таблице.

Обоснование выбора программно-аппаратных средств решения обратной задачи

Так как методика решения обратной задачи основана на решении прямых задач, то необходимо остановиться на обосновании

использованных при демонстрации методики программных и аппаратных средств решения прямой задачи геомеханики.

Отметим, что при решении серии прямых задач использовалось два пакета со свободной лицензией Code_Aster и Salome во взаимодействии между собой [8, 9].

Code_Aster – пакет для моделирования методом конечных элементов. Разрабатывается в основном компанией EDF (Électricité de France S.A. – крупнейшей энергетической компанией Франции) и первоначально использовался для моделирования узлов и конструкций электростанций, включая атомные. Первая версия была выпущена в 1989 г., в 2001 он был выпущен под открытой лицензией GPL. Данный пакет способен решать задачи термодинамики, механики и ряд смежных, таких как акустика. Решаемые задачи могут быть как линейными, так и нелинейными, статическими и динамическими (имеется explicit решатель). Code_Aster широко используется для решения задач геомеханики и строительства. Имеется широкий выбор моделей материалов для моделирования скальных, осадочных пород и строительных материалов. Пакет сам по себе не имеет графического интерфейса, все управление им выполняется с помощью скриптов и командной строки [8]. Поэтому для подготовки моделей для расчета и анализа полученных материалов следует использовать дополнительное ПО, такое как Salome [9].

Salome – пакет для пре- и постпроцессинга при решении задач методом конечных элементов. Данный пакет предлагает графический интерфейс пользователя, с помощью которого можно создать геометрию модели (для этого имеется полный набор инструментов твердотельного моделирования), построить конечно-элементную сетку, выполнить визуализацию и анализ результатов. Геометрические модели могут получаться из других САПР, Salome поддерживает наиболее распространенные форматы обмена 3D данными [9].

Механические свойства материалов, использованных при моделировании многослойной структуры модели шахтного поля

Порода	Плотность, кг/м ³	Модуль Юнга, ГПа	Коэф. Пуассона
Отложения	2300	0,2	0,49
Глинисто-мергелистая толща	2200	0,7	0,35
Каменная соль	2300	1,64	0,29
Песчаник	2700	35	0,19

Salome в первую очередь создавался как пакет, обеспечивающий графический интерфейс подготовки моделей и анализа результатов для Code_Aster, но также может использоваться и с другим расчетным ПО, например Elmer или OpenFOAM. Salome также разрабатывается в основном EDF и был выпущен под открытой лицензией GPL в 2001 г.

При расчетах использовалась рабочая станция с характеристиками: 2 процессора Xeon E5-2420 с тактовой частотой 1,9 ГГц, каждый процессор имеет 6 ядер, оперативная память станции четвертого поколения составляет 256 Гб.

Демонстрация методики решения обратной задачи

С помощью указанных программно-аппаратных средств решен набор реперных задач, определяющих горизонтальные перемещения дневной поверхности шахтного поля в выбранных точках поверхности (рис. 1). Предполагалось, что в качестве нагрузок в реперных задачах задавались

равномерные по величине давления на боковых поверхностях, равные 10^5 Па (рис. 2).

Для указанных ключевых точек 1–4 (рис. 1) авторами для единичного давления на первой из поверхностей получено решение (UX, UY – значения перемещений вдоль осей $0x$ и $0y$):

$$UX_1^1 = 0,26911, \quad UX_1^2 = 0,00846612,$$

$$UX_1^3 = -0,21576, \quad UX_1^4 = -0,0252429,$$

$$UY_1^1 = 0,178092, \quad UY_1^2 = 0,152157,$$

$$UY_1^3 = -0,61537, \quad UY_1^4 = 0,171271.$$

Из решений «реперных» краевых задач для семи оставшихся боковых поверхностей с единичными нагрузками совершенно аналогично определяются значения $UX_i^1, UX_i^2, UX_i^3, UX_i^4, UY_i^2, UY_i^3, UY_i^4$ ($i = 2, 8$). Далее с помощью полученных решений формируется матрица «жесткости» модели шахтного поля в виде

$$A = \begin{bmatrix} UX_1^1 & UX_2^1 & UX_3^1 & UX_4^1 & UX_5^1 & UX_6^1 & UX_7^1 & UX_8^1 \\ UX_1^2 & UX_2^2 & UX_3^2 & UX_4^2 & UX_5^2 & UX_6^2 & UX_7^2 & UX_8^2 \\ UX_1^3 & UX_2^3 & UX_3^3 & UX_4^3 & UX_5^3 & UX_6^3 & UX_7^3 & UX_8^3 \\ UX_1^4 & UX_2^4 & UX_3^4 & UX_4^4 & UX_5^4 & UX_6^4 & UX_7^4 & UX_8^4 \\ UY_1^1 & UY_2^1 & UY_3^1 & UY_4^1 & UY_5^1 & UY_6^1 & UY_7^1 & UY_8^1 \\ UY_1^2 & UY_2^2 & UY_3^2 & UY_4^2 & UY_5^2 & UY_6^2 & UY_7^2 & UY_8^2 \\ UY_1^3 & UY_2^3 & UY_3^3 & UY_4^3 & UY_5^3 & UY_6^3 & UY_7^3 & UY_8^3 \\ UY_1^4 & UY_2^4 & UY_3^4 & UY_4^4 & UY_5^4 & UY_6^4 & UY_7^4 & UY_8^4 \end{bmatrix},$$

которая при численном решении поставленной задачи приобрела следующие значения:

$$\begin{bmatrix} 0,26911 & 0,26912 & 0,269296 & 0,288624 & 0,549544 & 0,249384 & 0,268841 & 0,268758 \\ 0,00846612 & 0,00844857 & 0,109915 & 1,3931 & 0,00448064 & 0,00846571 & 0,00847268 & 0,00846952 \\ -0,21576 & 0,259108 & 0,185695 & 0,165525 & 0,165534 & 0,165497 & 0,165469 & 0,0593504 \\ -0,0252429 & -0,0252343 & -0,0252108 & -0,0251494 & 0,00911664 & -0,0830039 & -0,0811797 & -0,0576545 \\ 0,178092 & 0,178091 & 0,177689 & 0,175842 & 1,25451 & 0,186281 & 0,178118 & 0,177962 \\ 0,152157 & 0,152145 & -0,103831 & 1,16658 & 0,158108 & 0,152164 & 0,15216 & 0,15216 \\ -0,61537 & -0,0738674 & 0,0247414 & 0,0291127 & 0,0291667 & 0,0291993 & 0,0291846 & 0,0494797 \\ 0,171271 & 0,171426 & 0,171422 & 0,171462 & 0,192623 & 0,575631 & 0,18475 & 0,152272 \end{bmatrix}.$$

Для решения обратной задачи необходимо задать измеренные перемещения индикаторных ключевых точек в виде вектора значений \mathbf{b} :

$$\mathbf{b} = (UX_1^1, UX_1^2, UX_1^3, UX_1^4, UY_1^1, UY_1^2, UY_1^3, UY_1^4)^T.$$

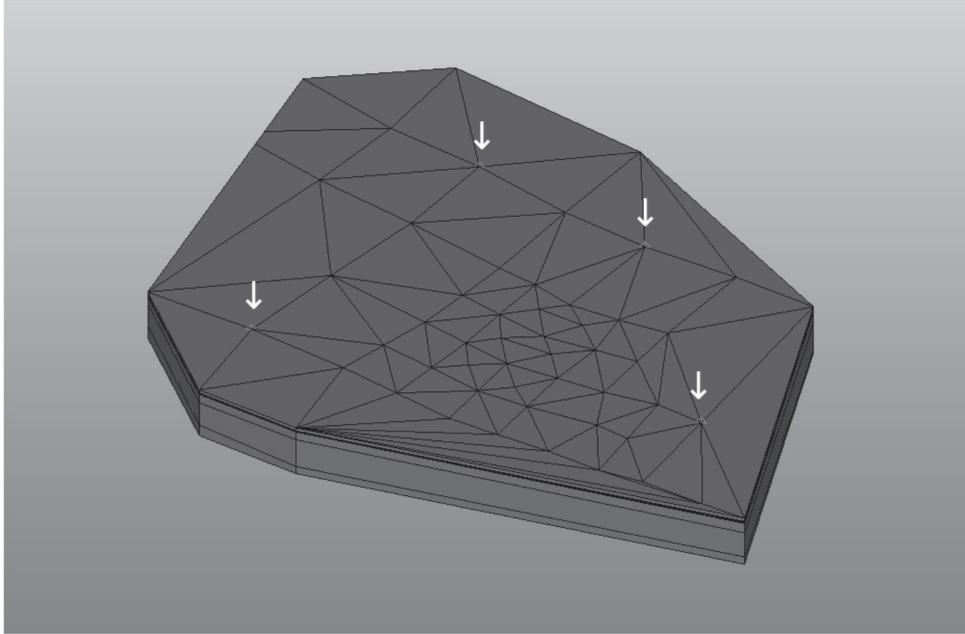


Рис. 1. Выбор индикаторных точек, указанных стрелками, по перемещениям, в которых будет определяться воздействие на боковые поверхности

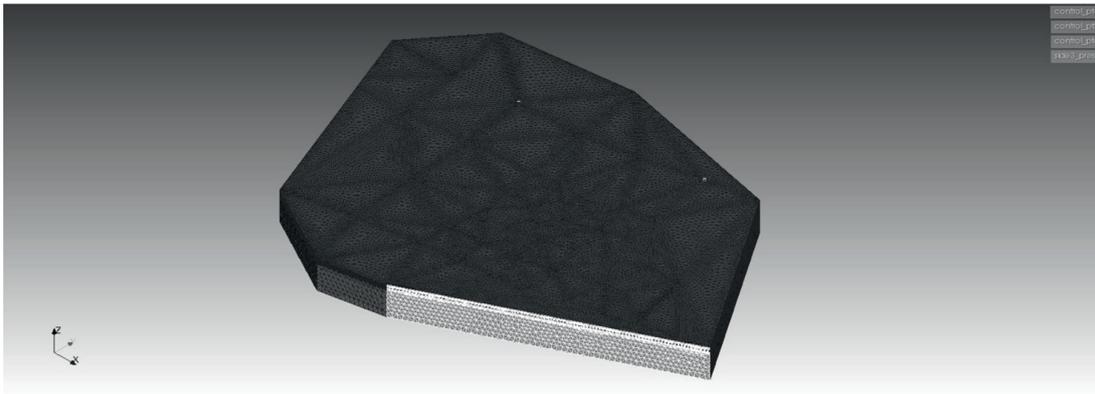


Рис. 2. Поочередное приложение давления, принятого за единичное, на каждую в отдельности боковую поверхность модели шахтного поля для построения реперных решений

Тогда реальные давления, приложенные к боковым граням, определяемые вектором безразмерных коэффициентов $\mathbf{p} = (p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7, p_8)^T$, измеряемых в долях от принятого за единицу давления 10^5 Па, будут определяться из решения системы линейных уравнений:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{p} = \mathbf{b}.$$

Таким образом, в сделанных предположениях обратная задача имеет единственное решение, если количество вертикаль-

ных граней модели шахтного поля четно, а количество индикаторных точек на дневной поверхности равно половине количества боковых граней.

Дополнительные замечания по организации и уточнению определения изменения естественного поля напряжений

С практической точки зрения для повышения точности решения обратной задачи, выбираемые индикаторные точки должны располагаться вокруг геометрического цен-

тра тяжести модели дневной поверхности шахтного поля на значительном расстоянии от центра.

Главная трудность в точном решении обратной задачи в данной формулировке – это определение горизонтальных смещений индикаторных точек дневной поверхности в абсолютной системе координат. Только в случае обеспечения достаточной точности таких измерений можно говорить об адекватном решении обратной задачи и определении изменения нагрузок на боковых вертикальных гранях модели шахтного поля.

Продемонстрированное решение обратной задачи определяет изменение среднего значения давления (или нормального напряжения) всей грани модели шахтного поля целиком относительно предыдущих положений горизонтальных координат датчиков на дневной поверхности, принятых за исходное состояние системы.

Для того чтобы получить более точную информацию о характере изменения давления по глубине при горизонтальном сдвиге датчиков положения, необходимо пробурить глубинные скважины по периметру предполагаемого шахтного поля и расположить датчики смещений не только на поверхности скважины, но и на глубинах, соответствующих серединам геологических слоев модели шахтного поля [10].

В этом случае решение обратной задачи будет также однозначным, и пользователь будет знать характер изменения давления по глубине, предполагая, что давление постоянно уже только на площади геологического слоя, а не всей торцевой поверхности модели шахтного поля.

Модуль решения обратной задачи с использованием параллелизуемых решений прямых задач

В связи с необходимостью автоматизации обработки геолого-механической информации о состоянии шахтного поля [11, 12] разработано программное обеспечение для автоматизации решения обратной задачи. В качестве инструментов для разработки ПО использовались платформа Java с библиотекой Swing и язык программирования Python.

Платформа Java использовалась, так как она позволяет создавать программное обеспечение, работающее на компьютерах с различными операционными системами и свободно переносимое между ними. Библиотека Swing также является мультиплатформенной и обеспечивает создание графического интерфейса.

Скрипт на языке Python используется для построения геометрии шахтного поля, и получения сетки конечных элементов на ее основе, включая группы для ограничений и приложения давлений. В нем для этих целей используются функции пакета Salome.

Главный интерфейс программы представляет собой окно с четырьмя вкладками, в которых выполняются четыре основных этапа решения задачи:

- 1) построение сетки конечных элементов;
- 2) задание координат контрольных точек и получение номеров ближайших к ним узлов;
- 3) выполнение восьми расчетов с нагружением на разные грани модели шахтного поля и получение матрицы;
- 4) ввод фактических смещений на контрольных точках и получение результата.

Алгоритмическая последовательность действий при решении обратной задачи на разработанном программном обеспечении определяется последовательностью вкладок (рис. 3). При нажатии на первой вкладке выполняются служебные действия, при которых формируется модель шахтного поля, затем запускается Python скрипт, который с помощью пакета Salome формирует сначала полную геометрическую модель шахтного поля, а затем на ее основе конечно-элементную сетку.

Следующим этапом является ввод контрольных точек и нахождение ближайших к ним узлов конечно-элементной сетки. Для этого следует использовать вторую вкладку (рис. 3). В полях ввода вводятся координаты четырех точек, по нажатию кнопки Готово, открывается файл с сеткой и перебираются узлы в нем, с целью поиска узлов, наиболее близких к указанным координатам. Результат показывается в правом текстовом поле.

После выполнения данного этапа следует переходить к следующей вкладке: «Получение матрицы» (рис. 3). На этом этапе формируются файлы заданий для расчета каждого варианта прямой задачи.

Файлы заданий формируются программно, по два файла на каждый вариант. Первый файл описывает материалы модели, тип расчета, накладываемые на модель нагрузки и ограничения. Вторым файлом описываются параметры запуска, имена файлов и т.д.

Файлы заданий формируются на основе шаблонов, приведенных в приложениях. В ходе решения каждого варианта задачи процесс можно распараллеливать на необходимое количество потоков. Следует отметить, что программа будет сохранять работоспособность и при одном потоке.

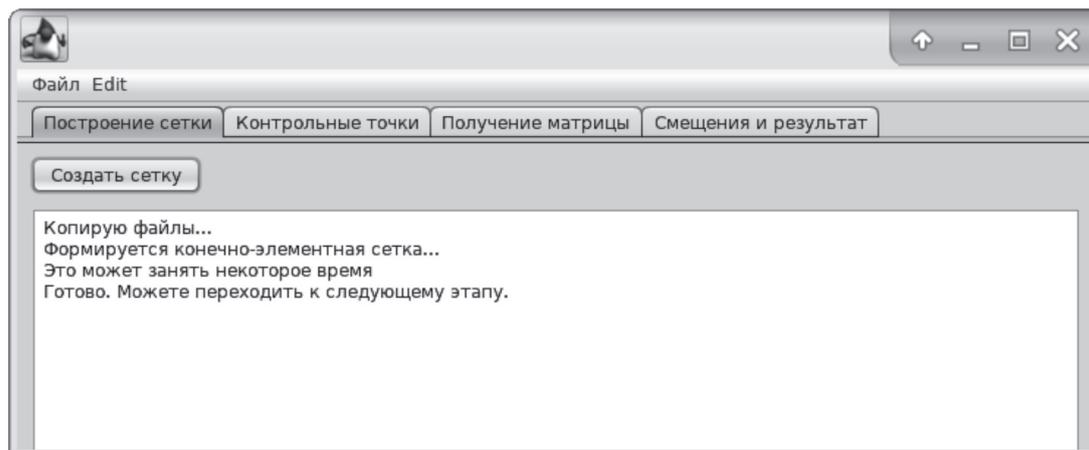


Рис. 3. Главный интерфейс программы для решения обратной задачи

Количество потоков ограничивается только количеством вычислительных ядер на вычислительной машине, где запускается данное ПО. Устанавливать количество потоков большее, чем имеется ядер в системе, нецелесообразно. Количество потоков можно ввести в окне интерфейса.

Также можно задать объем памяти, который следует выделить для решения задачи. Если необходимый объем не будет выделен, задача не сможет быть решена, даже если физически памяти в системе достаточно. Необходимый объем устанавливается экспериментально, например при 1 миллионе элементов минимально необходимый объем памяти составляет 16 Гбайт.

После построения матрицы следует ввести фактические перемещения на контрольных точках и получить значения давлений (вкладка «Смещение и результат»). Координаты смещений контрольных точек вводятся в левой части окна. Столбец с вычисленными значениями давлений на гранях модели выводится в текстовом поле в правой части окна. Кроме основного окна с вкладками интерфейс предусматривает окно настроек.

Очень важно не оставлять их пустыми а выбрать здесь, во-первых, рабочий каталог, в котором будут находиться все файлы моделей, расчетов и т.д., а во-вторых, каталог, в котором находится пакет Salome, так как с его помощью выполняются построения конечно-элементной сетки и решения прямых задач.

Заключение

Разработана общая методика решения обратной задачи для определения прира-

щения давлений на боковых поверхностях модели шахтного поля по горизонтальным сдвигениям дневной поверхности шахтного поля. Она позволяет учесть в геомеханических расчетах изменение напряженного состояния на границах выработок любых полезных ископаемых в районах близких к сейсмически активным областям.

Разработан масштабируемый и параллелизуемый модуль решения обратных задач определения средних величин измененного природного поля напряжений по данным натурных измерений горизонтальных сдвижений дневной поверхности модели шахтного поля II и III горизонтов шахтного поля IV РУ ОАО «Беларуськалий».

Список литературы

1. Гзовский М.В. Основы тектонофизики / М.В. Гзовский. – М.: Недра, 1975. – 536 с.
2. Интерпретация геофизических материалов / А.А. Булычев, И.В. Лыгин, Т.Б. Соколова [и др.]. – Тверь: ГЕРС, 2011. – 208 с.
3. Букреев В.Г. Алгоритмы обнаружения предвестников геодинамического события / В.Г. Букреев, С.И. Колесникова, А.Н. Мертвцов. – Saarbrücken: Lap Lambert Academic Publishing GmbH & Co., 2012. – 180 с.
4. Сашурин А.Д. Современные геодинамические движения и их роль в формировании напряженно-деформированного состояния массива горных пород / А.Д. Сашурин // Геомеханика в горном деле: доклады Всероссийской научно-технической конференции с международным участием 4–5 июня 2014 г. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2014. – С. 3–11.
5. Тагильцев С.Н. Закономерности распределения тектонических напряжений в верхней части геологического разреза горноскладчатых регионов / С.Н. Тагильцев // Геомеханика в горном деле: доклады Всероссийской научно-технической конференции с международным участием 4–5 июня 2014 г. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2014. – С. 12–17.
6. Нурпеисова М.Б. Геомеханика / М.Б. Нурпеисова, М.А. Июфис, И.В. Милетенко. – Алматы: КазНТУ, 2014. – 275 с.
7. Лейбензон Л.С. Курс теории упругости / Л.С. Лейбензон. – М.: ОГИЗ, 1947. – 464 с.

8. Официальный сайт разработчика программного продукта Code_Aster для решения структурно-механических задач. URL: <https://www.code-aster.org> (дата обращения: 24.05.2018).

9. Официальный сайт разработчика программы пре- и постпроцессинга задач структурной механики Salome. URL: <http://www.salome-platform.org/> (дата обращения: 24.05.2018).

10. Косков Б.В. Геофизические исследования скважин и интерпретация данных ГИС / Б.В. Косков, В.Н. Косков. – Пермь: Пермский государственный технический университет, 2007. – 317 с.

11. Цыдапова М.В. Геоинформационные системы и технологии / М.В. Цыдапова. – Улан-Удэ: Издательство Бурятского государственного университета, 2016. – 52 с.

12. Кузнецов О.Л. Геоинформатика и геоинформационные системы / О.Л. Кузнецов, А.А. Никитин, Е.Н. Черемисина. – М.: ВНИИгеосистем, 2005. – 453 с.

References

1. Gzovskij M.V. Osnovy tektonofiziki / M.V. Gzovskij. – М.: Nedra, 1975. – 536 p.

2. Interpretaciya geofizicheskix materialov / A.A. Buly'chev, I.V. Ly'gin, T.B. Sokolova [i dr.]. – Tver': GERS, 2011. – 208 p.

3. Bukreev V.G. Algoritmy obnaruzheniya predvestnikov geodinamicheskogo sobytiya / V.G. Bukreev, S.I. Kolesnikova, A.N. Mertveczov. – Saarbrücken: Lap Lambert Academic Publishing GmbH & Co., 2012. – 180 p.

4. Sashurin A.D. Sovremennye geodinamicheskie dvizheniya i ix rol' v formirovanii napryazhenno-deformirovannogo

sostoyaniya massiva gorn'x porod / A.D. Sashurin // Geomechanika v gornom dele: doklady Vserossijskoj nauchno-texnicheskoj konferencii s mezhdunarodny'm uchastiem 4–5 iyunya 2014 g. – Ekaterinburg: IGD UrO RAN, 2014. – pp. 3–11.

5. Tagil'cev S.N. Zakonomernosti raspredeleniya tektonicheskix napryazhenij v verxnej chasti geologicheskogo razreza gornoskladchat'x regionov / S.N. Tagil'cev // Geomechanika v gornom dele: doklady Vserossijskoj nauchno-texnicheskoj konferencii s mezhdunarodny'm uchastiem 4–5 iyunya 2014 g. – Ekaterinburg: IGD UrO RAN, 2014. – pp. 12–17.

6. Nurpeisova M.B. Geomechanika / M.B. Nurpeisova, M.A. Iofis, I.V. Miletenko. – Almaty': KazNTU, 2014. – 275 p.

7. Lejbenzon L.S. Kurs teorii uprugosti / L.S. Lejbenzon. – М.: OGIZ, 1947. – 464 p.

8. Oficial'ny'j sajt razrabotchika programmnogo produkta Code_Aster dlya resheniya strukturno-mexanicheskix zadach. URL: <https://www.code-aster.org> (дата обращения: 24.05.2018).

9. Oficial'ny'j sajt razrabotchika programmy pre- i post-processinga zadach strukturnoj mexaniki Salome. URL: <http://www.salome-platform.org/> (дата обращения: 24.05.2018).

10. Koskov B.V. Geofizicheskie issledovaniya skvazhin i interpretaciya danny'x GIS / B.V. Koskov, V.N. Koskov. – Perm': Permskij gosudarstvenny'j texnicheskij universitet, 2007. – 317 p.

11. Cydapova M.V. Geoinformacionny'e sistemy i tehnologii / M.V. Cydapova. – Ulan-Ude': Izdatel'stvo Buryatskogo gosuniversiteta, 2016. – 52 p.

12. Kuznecov O.L. Geoinformatika i geoinformacionny'e sistemy / O.L. Kuznecov, A.A. Nikitin, E.N. Cheremisina. – М.: VNIIGeosistem, 2005. – 453 p.